Gli esperimenti al Large Hadron Collider e introduzione alle attività pratiche

Stefano Belforte
INFN – Trieste
____CMS

Ovvero: preparazione ad un pomeriggio da fisici sperimentali

Premessa

- ◆ Sui rivelatori di particelle, LHC e gli esperimenti ad LHC si trovano tante belle presentazioni su web, piene di dettagli interessanti. Anche partendo dal sito della Masterclass
 - http://www.physicsmasterclasses.org/index.php?cat=local_organisation&page=orga_lectures

♣ In questa presentazione cerchero' soprattutto di dare un filo conduttore ragionato del perche' e percome, anche a costo di semplificare

Non vi preoccupate se non capite tutto

Un percorso a tappe

- 1. Noi fisici sperimentali
- 2. La misura di oggi
- 3. La rivelazione delle particelle elementari
- 4. LHC
- 5. CMS
- 6. Il pomeriggio

TAPPA 1/6: noi fisici sperimentali

La fisica sperimentale

- τά φυσικά = le cose naturali
- Fisici o naturalisti?

- Osservo e descrivo
- Misuro ed esperimento

Cosa e' un esperimento?

Esperimento

- Fare una domanda alla natura e leggere la risposta
- Meglio la domanda e' formulata, piu' la risposta e' utile
 - Non ci sono ricette: aguzzare l'ingegno
- Cosa e' l'elettricita'?
- Se collego questi due fili, la lampadina si accende?
- * Se lascio cadere una palla di legno e una di ferro dalla torre di Pisa, arrivano a terra assieme ?

Risposte non banali

- Molte domande non hanno risposta si/no
- ♣ In quanto tempo cade la palla da 1m? da 3m?
- Si fa una misura
- Alcune misure sono piu' difficili di altre
 - Anche semplicemente da definire
 - Quanto e' grande questa stanza?
 - Quante persone ci sono ?
 - Quante molecole di gas? Di Ossigeno? Di Xeno?

Misura

- Affermazione quantitativa rispetto ad una proprieta' della natura
 - Osservabile
- Ripensiamo al numero di molecole di gas
 - MISURA = NUMERO + INCERTEZZA

Spesso questa incertezza di chiama errore, ma l'incertezza non e' uno sbaglio!

Sorgenti di incertezza nella misura

- Sbaglio
- Limite nella precisione dello strumento
- Difetto nello strumento

• COME RIDURLE?

Perche' non dico "come eliminarle"?

Lo sbaglio

- Verificare quello che e' stato fatto
 - Mi sono dimenticato qualcosa?
 - Avere un programma, seguirlo, documentare
 - Documentare = un'altra persona puo' riprodurre
- Riprovare (riproducibilita')
- Confronto con altre misure
 - Fatte da noi, da altri, con altri strumenti o metodiche
- Discussione con altri sperimentatori
 - Se la stessa cosa ci viene diversa, un motivo ci sara'!
 - Discutere per capire, non per decidere chi ha ragione

La precisione dello strumento

- Questa dobbiamo conoscerla = misurarla
- Quanto e' grande la stanza ?
 - Piedi? Metri? Questo metro misura i cm? i mm?
 - Risoluzione dello strumento
- Mi posso fidare del mio strumento ?
 - Se misuro il metro campione di Parigi, cosa trovo?
 - Calibrazione
 - QUANTO mi posso fidare?
- La pazienza ci aiuta
 - N misure con risoluzione σ : precisione $\Rightarrow \sigma/(\sqrt{N})$

Difetto nello strumento o procedura

- Non ci dovrebbe essere
- Diffetto noto
 - Correggo
 - Ho un incertezza sulla correzione, contribuisce alla incertezza sulla misura. Errore sistematico
- Difetto ignoto
 - Come uno sbaglio
 - Verifico, confronto, discuto, ripeto, mi danno nel sonno pensando dove potrei aver sbagliato e cosa ho trascurato

TAPPA 1/6: noi fisici sperimentali

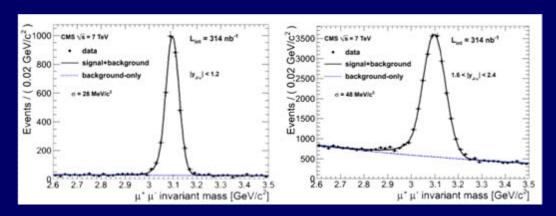
- Vogliamo fare domande alla natura
- Vogliamo riposte quantitative (misure)
- Vogliamo sapere quanto sono buone
- Il metodo sperimentale:
 - Provare e riprovare
 - Conoscere il proprio strumento
 - Documentare, criticare, discutere, confrontare
 - Procedura definita e documentata → verifica e automatizzazione
 - Non dare nulla per scontato (ma fare tesoro delle cose capite)
- La parola magica: "Perche'?"



Tappa 2/6: La misura di oggi

La domanda

- Ma insomma, questa J/Ψ esiste?
- Mi dicono che l'hanno vista, ma mica ci credo
- Pero'. Hanno scritto un articolo con tutti i dettagli
 - http://cms.web.cern.ch/cms/Media/Publications/CMStimes/2011/03_07/
 - http://arxiv.org/pdf/1011.4193.pdf



- Allora provo a rifarlo! Perche' sono curioso!
 - Imparero' sicuramente tante cose nuove

Stiamo coi piedi per terra

- Questo pomeriggio non dovete dimostrare che CMS ha sbagliato (o meno)
- ♣ Ma proverete a ripercorrere alcuni passi di questa misura per toccare con mano alcuni aspetti del lavoro dei fisici di LHC, in particolare nella analisi dei dati
- Senza dimenticare che non sarete minimamente esposti a una altra enorme quantita' di cose e lavori degli scienziati che sono stati necessari per poter arrivare ad avere quei dati (ad esempio la costruzione dei rivelatori)

Nota importante

- Oggi cerchiamo la J/Ψ a CMS, ma non perche' e' un lavoro specifico di CMS
 - J/Ψ e' una particella famosa e affascinante
- Le scoperte non sono solo l'osservazione di nuove particelle, lo studio dettagliato di processi apparentemente noti ha dato e puo' dare grandi sorprese. Forse anche la J/Ψ non ci ha ancora detto tutto che puo' dirci sui segreti della fisica.

* J/Ψ e' osservabile (e importante) anche per Atlas, per Alice, per LHCb e per Compass. Potremmo fare esattamente la stessa cosa coi dati di quegli esperimenti

Cosa vuol dire vedere una particella elementare?

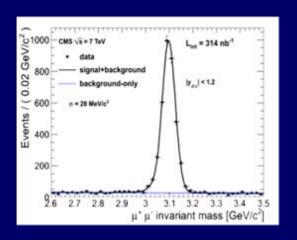
- Elettrone, chi era costui? Chi l'ha mai visto?
- Il protone e' elementare ?
- Una particella deve avere una identita', qualcosa che la differenzia dalle altre e in qualche modo e' immutabile (la posso misurare di nuovo ed e' quella)
 - Numeri quantici: carica, spin, massa ...
- Massa = massa a riposo
 - E=mc² se mi muovo ho energia, e quindi massa
- Posso fermare una J/Ψ? Metterla sulla bilancia?

100 anni di fisica in una slide

- La J/Ψ non e' stabile, decade
 - Vita media: 10⁻²⁰ sec
 - A volte (6%) in due muoni di carica opposta
 - J/Ψ ha carica =0
- Non ha una massa definita



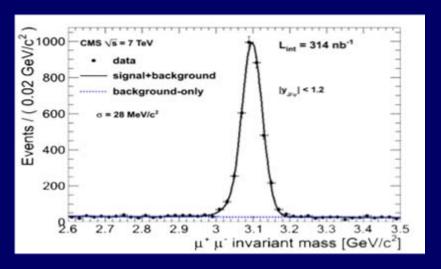
- La larghezza e' un indicazione di quanto facilmente puo' decadere
 - Particella stabile : larghezza zero e massa ben definita
- La larghezza misurata dipende anche dalla precisione dello strumento



Cosa si misura?

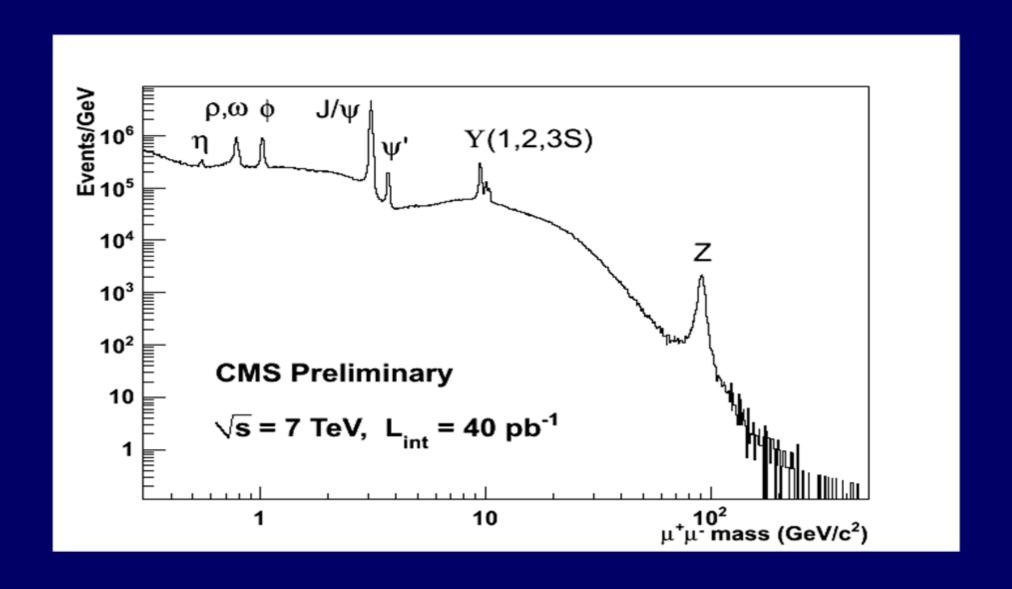
- La massa della J/Ψ non e' un'osservabile
- ♣ La J/psi decade in due particelle stabili (muoni, µ)
- Massa della J/Ψ e' >> di 2 volte la massa del μ
- E=mc²: Massa in eccesso → energia dei μ
- Le proprieta' dei muoni sono osservabili
 - Dalla loro massa e impulso, posso calcolare la massa invariante di "quello che e' decaduto" con una formula matematica
- La teoria dice
 - La massa invariante dei prodotti del decadimento ha una distribuzione di probabilita' definita e caratteristica della J/Ψ (slide precedente)

Massa invariante di coppie di muoni



- ♣ La teoria ci dice la forma della distribuzione (signal) e sembra riprodurre i dati sperimentali quando combinata con la conoscenza dello strumento
 - Perche' non ho detto "la teoria e' giusta"?
- Background? Perche' abbiamo dati teoria dice 0?
 - Non tutti i muoni vengono da J/Ψ
 - Non tutte le particelle che sembrano un muone lo sono davvero

Tutti i muoni di CMS



Programma per la scoperta della J/Y

Tra tutti i muoni dell'universo, ce ne saranno alcuni che a coppie derivano dal decadimento di quell'oggetto chiamato J/Ψ, li scelgo, ne misuro la massa invariante e vedo come e' distribuita, se la fisica non e' un'opinione ottengo una distribuzione come quella che le leggi della fisica (quantisticarelativistica) mi dicono corrisponde al decadimento della J/\Psi e cosi' confermo che esiste e misuro la massa e la larghezza

• Quale e' la parte piu' difficile ?

Cosa ci serve?

- Meglio iniziare con un campione di muoni che hanno una alta probabilita' di essere quelli giusti
 - Limitiamoci ai muoni prodotti ad LHC

 Uno strumento per riconoscere i muoni e misurarne la velocita' (impulso)

Una procedura(*) per registare le misure e alla fine ottenere la distribuzione

(*) documentata, verificabile, riproducibile, automatizzabile

Tappa 2/6: La misura di oggi

- Vogliamo vedere la J/Ψ:
 - Un segnale (picco) nella distribuzione della massa invariante di due muoni di carica opposta
- Per questo useremo
 - Una fabbrica di J/Ψ : LargeHadronCollider
 - Un rivelatore di muoni: CMS
 - Una procedura per misurare gli impulsi dei muoni: il sistema di processamento dati di CMS
 - Una procedura per scegliere i muoni, calcolare la massa invariante di una coppia di particelle: la scopriremo questo pomeriggio

Tappa 3/6: rivelatori di particelle

100 anni di fisica in una slide (2)

- Il decadimento di una particella appartiene al mondo quantistico
 - In meccanica classica due corpi attaccati si separano, nulla si crea
- ♣ I processi quantistici dominano nel piccolo
- + Il mondo che osserviamo quotidianamente e' classico
 - Anche se la rivelazione della luce nell'occhio e' un fenomeno quantistico
- Non c'e' un taglio netto, ma una transizione non ancora ben capita
- ♣ Per i nostri scopi le particelle che decadono dopo aver percorso distanze macroscopiche (micron!) sono osservabili come quelle stabili

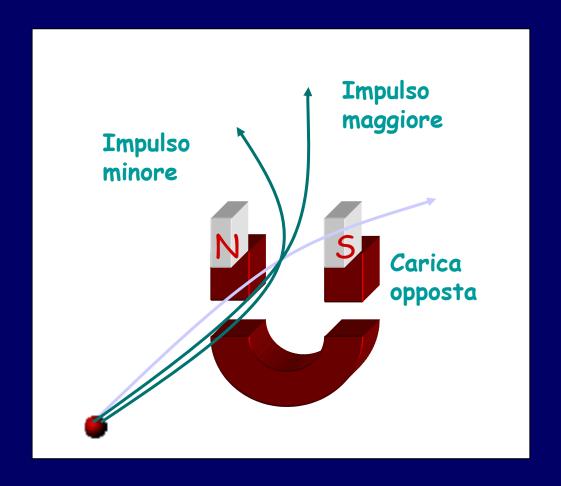
Rilevatori di particelle

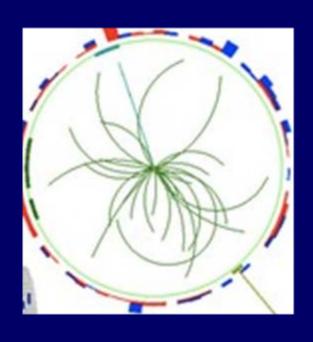
- Sono osservabili le proprieta' di particelle stabili
- Stabili = che non decadono su tempi lunghi rispetto a quelli della meccanica quantistica
- Riveliamo le particelle tramite la loro interazione con la materia, in cui rilasciano cosi' tanta energia da produrre effetti macroscopici
- In particolare le particelle cariche possono strappare via elettroni da atomi di gas o spostare elettroni in un conduttore → segnali elettrici
- ♣ In pratica tutti i rivelatori che usiamo oggi producono alla fine un segnale elettrico che possiamo poi digitalizzare e processare con i computers

Le particelle, attraversando la materia, perdono una parte della loro energia

- ◆ Particelle cariche: urti anelatici con gli elettroni degli atomi che incontrano;
- ♣ Tutti gli adroni (carichi e neutri) per reazioni nucleari con i nuclei che incontrano;
- Elettroni emettono luce "frenando"
- ♣ Fotoni possono creare coppie e⁺ e⁻
- Muoni perdono poca energia, sono più penetranti

Una collisione pp produce tracce cariche, che curvano in campo magnetico

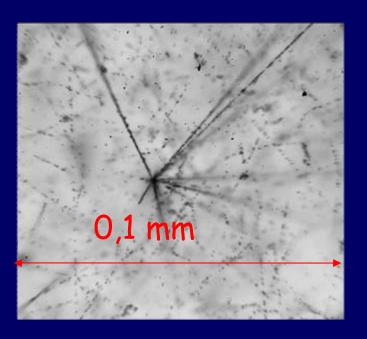




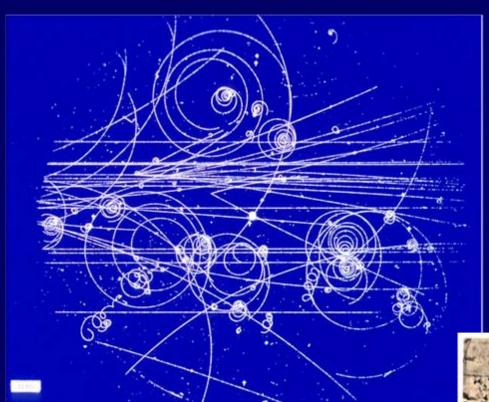
- → Dalla curvatura si puo' misurare l'impulso
- ♣ Ma come si vedono e si misurano queste traiettorie ?

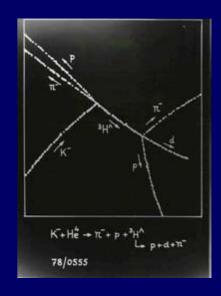
Emulsioni fotografiche

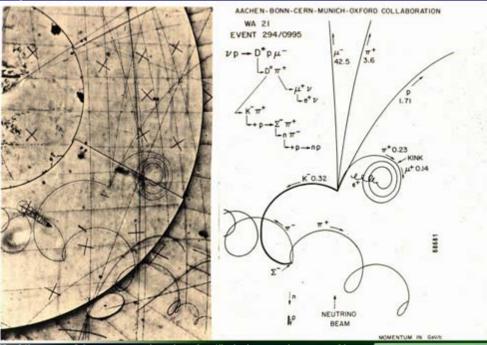
- ◆ Nei primi esperimenti con i raggi cosmici si inviavano lastre fotografiche sui palloni aerostatici
- ♣ Le particelle cariche "impressionano" le lastre fotografiche lasciando una scia del loro passaggio.



Camera a bolle



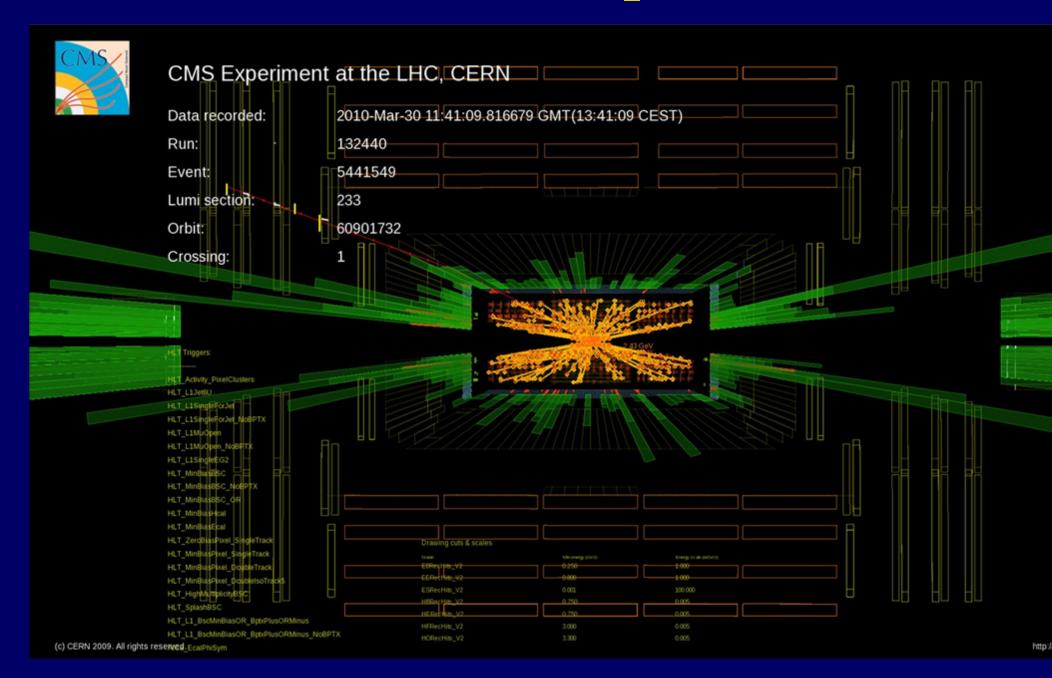




Ma come si misurano quelle tracce?

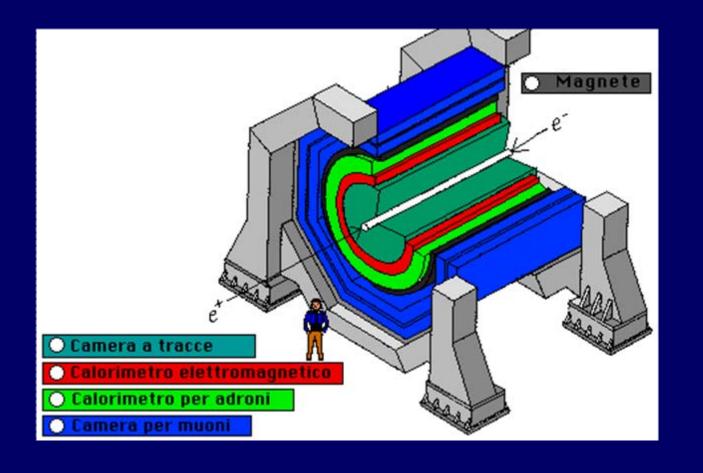


30 anni dopo



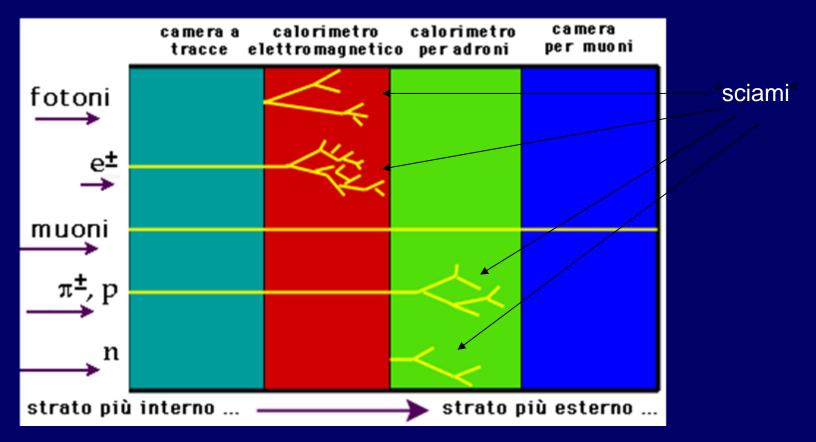
Un rivelatore per collider

- Struttura a "cipolla"
- I dettagli possono variare



Perche' gli strati

- Alcune particelle non riescono ad attraversare certi materiali, o sono invisibili fino a che non incontrano certi materiali
- Possono essere cosi' riconsciute



Tappa 3/6: rivelatori di particelle

- * Alcune particelle decadono prima di essere rivelate
 - Ne riveliamo i prodotti
- ♣ Le particelle cariche lasciano una traccia visibile e curvano nel campo magnetico: le osserviamo, riconosciamo e misuriamo l'impulso
- → Le particelle neutre le osserviamo facendole interagire in modo che diano prodotti carichi
- Molte particelle rilasciano tutta la loro energia nei calorimetri dove puo' essere misurata
- I muoni passano attraverso l'apparato lasciando solo una traccia
- Ogni misura diventa un segnale digitale raccolto e analizzato
- * Rivelatore moderno = super macchina fotografica digitale

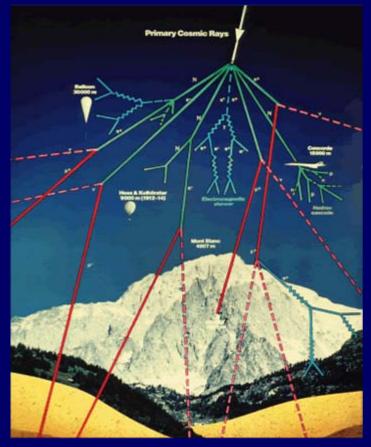
Tappa 4/6: LHC

LHC

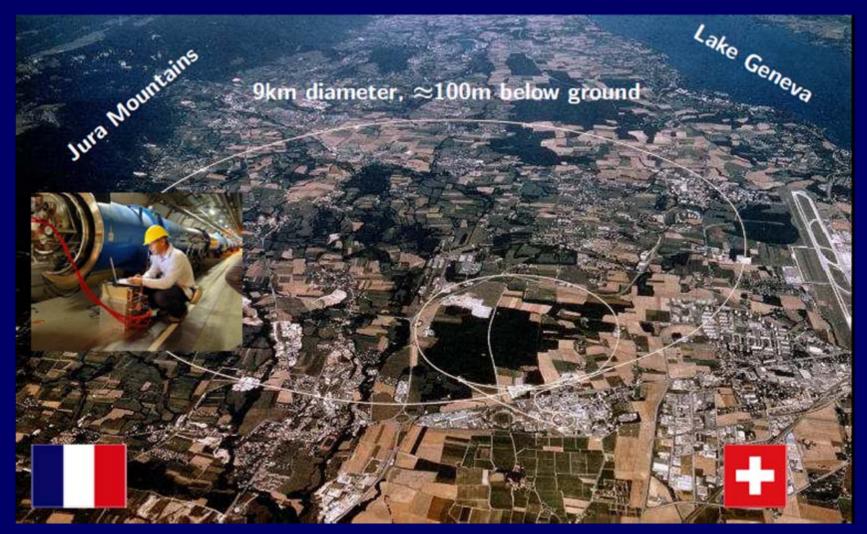


Large Hadron Collider

- Non e' stato costruito per riscoprire la J/psi
- Ma oggi non possiamo farvi scoprire quello che ancora stiamo cercando
- Perche' usiamo acceleratori?
- Gia' dal cielo arrivano protoni anche con energia maggiore (raggi cosmici)
 - Esperimento in situazione controllata (energia e.g.)
 - Rivelatore nel posto giusto
 - Altissima frequenza = rivelare fenomeni rari



Quanto Large?



♣ Le particelle accelerate alla velocita' della luce percorrono ~10mila volte al secondo la circonferenza di ~30Km (~7 in CH, resto in F)

Perche' Large?

- Grandi dimensioni necessarie per grande energia
 - E=mc² grande energia permette di scoprire nuove particelle di grande massa: Higgs, SUSY!
- La traiettoria delle particelle deve essere piegata per tenerle nell'anello
 - Curvatura in campo magnetico: r ~ p/B
 - Quando l'impulso p cresce, r aumenta
- ♣ LHC e' il massimo della tecnologia attuale, la sua costruzione ha spinto in avanti l'industria dei magneti superconduttori

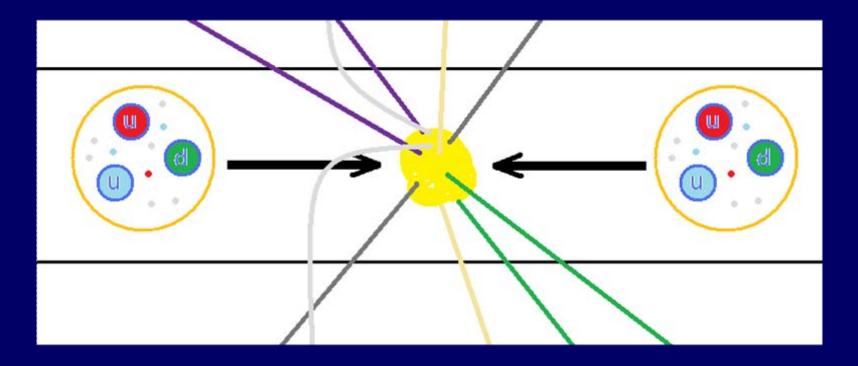
Perche' Hadron?

- Il 90% del tempo LHC fa collidere protoni con protoni
 - Ma puo' usare anche altre particelle cariche, in particolare nuclei di Piombo

- Non puo' essere usato con leptoni
 - LEP = Large Electron Positron (collider)
 - aveva le stesse dimensioni, ma raggiungeva energie inferiori, e' stato spento e smontato e nello stesso tunnel costruito LHC

Perche' Collider?

◆ Facendo sbattere un protone con un altro ad altissima energia, si puo' vincere momentaneamente la forza che tiene i quark confinati e creare una annichilazione dove tutta l'energia dei quark iniziali diventa disponibile per creare nuove particelle

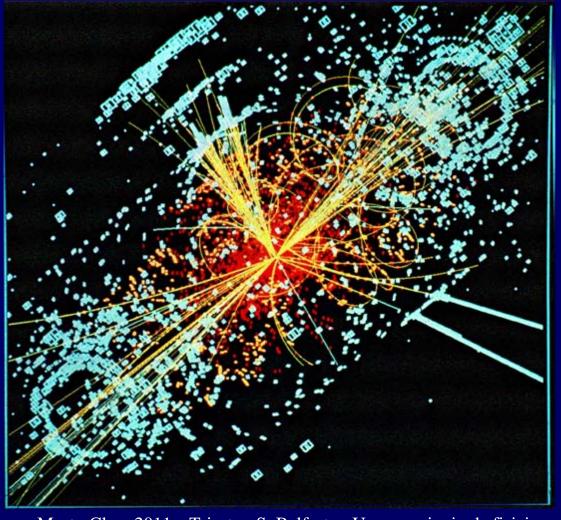


Perche' la forma ad anello?

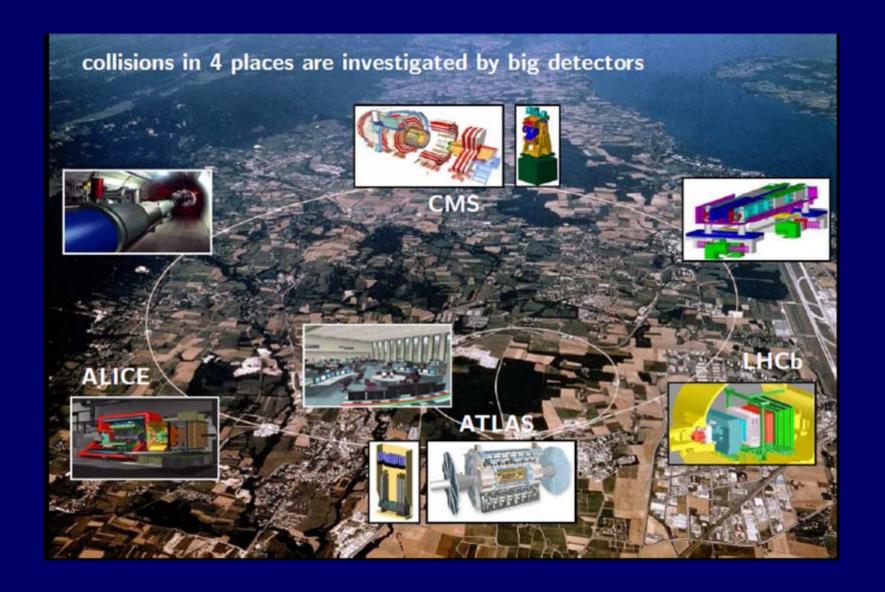
- ♣ Passando e ripassando attraverso zone di campi elettrici appropriati, i protoni sono accelerati sempre di piu' (come avere un acceleratore lungo milioni di Km)
- Ma non solo
- ♣ Due fasci che circolano in direzione opposte danno luogo a moltissime collisioni permettendo la ricerca di eventi rari
- ◆ Due "nuvolette" di protoni si incontrano ogni 25ns
- ♣ In media 20 collisioni protone-protone ogni volta
 - Dipende da quanto sono intense le nuvole
 - Nella presa dati 2010 (che userete voi), poco piu' di una collisione ad ogni incontro

L'evento

♣ L'insieme dei prodotti di una collisione, insomma la "foto" di quello che succede al meglio di come il nostro rivelatore permette, si chiama evento



Aggiungiamo i rivelatori



4 esperimenti



the four large LHC detectors



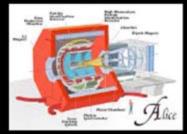
ATLAS (general purpose)
7000 tons, 25m diameter, 46m length
2500 scientists & engineers



CMS (general purpose) 14500 tons, 15m diameter, 22m length 3000 scientists & engineers



LHCb (b physics)
5600 tons, 13m width, 21m length
700 scientists & engineers



ALICE (heavy ion physics) 10000 tons, 16m diameter, 26m length 1000 scientists & engineers

Kristian Harder, RAL Masterclasses 2009

24

RAL involvement

Gli esperimenti a LHC

- Due esperimenti "general purpose": che possono studiare tutto lo spettro di fisica accessibile a LHC, ottimizzati per la ricerca di cose nuove
 - ATLAS CMS
- Due esperimenti specializzati per canali particolari di fisica
 - ALICE collisioni di ioni pesanti (Piombo)
 - Collisioni meno frequenti, ma piu' affollate
 - LHCb studio ad alta statistica del quark "b"
 - Ottimizzato per rivelare particelle prodotte in direzione vicina al fascio di protoni

Perche' Atlas e CMS?

- Due esperimenti "che possono fare tutto"
- Non ne bastava uno ?
 - Perche' ci sono cosi' tanti fisici delle particelle che avrebbero litigato in un solo esperimento?
 - Perche' se un esperimento scopre qualcosa di sensazionale bisogna che un gruppo diverso di persone con un rivelatore diverso confermi la scoperta prima di poterci credere ?
 - Perche' LHC costa cosi' tanto che raddoppiare la statistica e' comunque utile (precisione aumenta √2 e aumenta la probabilita' di scoprire qualcosa di raro) ?

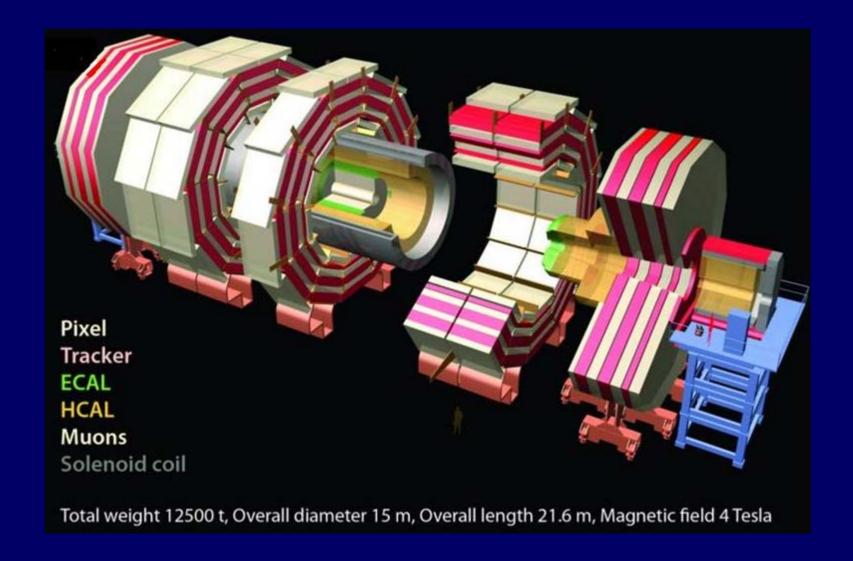
Tappa 4/6: LHC



- Il piu' grande acceleratore e collisionatore di particelle mai costruito
- ✦ Alla frontiera della tecnologia e che da' accesso allla frontiera dell'energia per la ricerca
- ♣ Permette di accedere a collisioni di tale energia che speriamo di avere risposte certe su domande fondamentali: Higgs, SUSY, materia oscura...
- Produce anche J/Ψ ©

Tappa 5/6: CMS

CMS



CMS come fotocamera

- 100 Megapixels
- 40 Milioni di foto al secondo
- Trigger (selezione in tempo reale)
 - 100 foto al secondo selezionate per analisi dettagliata
 - Circa 200MByte/secondo su media permanente (nastro)
- ◆ No, non li mettiamo su CD, in un anno sarebbe una pila di oltre 10Km di altezza

Cosa succede a tutti quei dati?

• 1. CALIBRAZIONE E RICOSTRUZIONE

- Applicare le correzioni note per passare da ampiezza di segnali elettrici ad esempio a misure di energia o posizione
- Combinare le informazioni di energia e posizione dai vari rivelatori per ricostruire traiettorie nello spazio ed identificare l'energia e massa delle particelle

• 2. SELEZIONE

• Selezionare le tracce e gli eventi che indicano che nella collisone e' stato prodotto qualcosa di interessante e studiarne le proprieta'

• 3. ANALISI

• Misurare le osservabili scelte negli eventi selezionati, studiarne la distribuzione, estrarre affermazioni quantitative

Come?

- 1. e' un processo automatico: predefinito dai fisici (con pena e fatica) e applicati da computers
- ◆ 2. comunque usando computers, ma la selezione si fa in base a criteri scelti dal ricercatore di volta in volta. In genere la selezione e' in piu' stadi successivi. E' un procedimento delicato e richiede risorse, cura e fatica
- ◆ 3. il computer calcola e disegna, lo scienziato decide cosa, come e cerca di capire

Questo pomeriggio faremo 3.

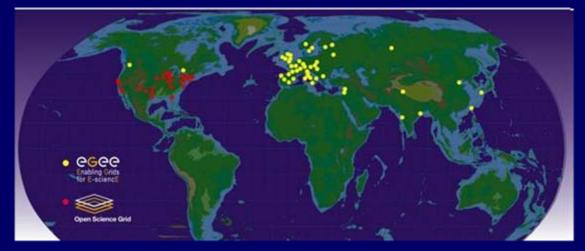
Che computer serve?

- Per 10 000 TB di dati
- Per 1000 scienziati di tutte le nazioni
- Un grande centro di calcolo ?



→ Quasi... in realta' 100 di questi, sparsi in tutto il

mondo



LHC Computing Grid

- Usare 100 centri di calcolo come se fossero una cosa sola
- Lo scienziato (user di questa gigantesca struttura) non sa e non si cura di dove sono i dati e dove viene eseguito il suo programma



Tappa 5/6: CMS

- Un rivelatore di particelle general purpose

- Ottimizzato per rivelare i muoni
- Ha raccolto dati nel 2010
- Sono stati calibrati, ricostruiti selezionati usando computers in 80 centri di calcolo sparsi per il mondo
- Oggi avremo a disposizione un campione di eventi selezionati per la ricerca di una particella instabile chiamata J/Ψ che CMS "osserva" rivelando i due muoni in cui decade
 - Non e' l'unico modo in cui decade, ne' l'unico che si puo' vedere a CMS

La parte pratica (finalmente)

- Partiremo da un piccolo campione di eventi in cui e' stata fatta una prima selezione richiedendo due tracce cariche compatibili con l'essere muoni
- Come spesso accade la prima selezione e' stata fatta con criteri non troppo selettivi
- ♣ Avrete a disposizione 100 eventi. Dovrete:
- 1. individuare criteri di selezione
- 2. applicarli
- 3. calcolare la massa invariante
- 4. esaminare il risultato
- 5. discutere, confrontare, capire

Troppo difficile?

- 1. criteri di selezione
 - vi guideremo noi (ma farete voi)
- 2. selezione
 - farete alla vecchia maniera: guardando le foto degli eventi
- 3. masssa invariante
 - C'e' una procedura automatica gia' pronta
- 4. fare grafici col computer sara' facile
 - vi guideremo noi
- 5. capire: non c'e' sostituto per l'intelligenza umana
 - dovrete pensare! Ma ce la farete



Troppo facile?

- ◆ Selezione degli eventi usando la visualizzazione al computer: la stessa procedura usata 20 anni fa per la scoperta della Z⁰ (premio Nobel)
- Procedura usata anche oggi per definire la selezione da applicare poi automaticamente col computer a miliardi di eventi
- Nessun fisico delle particelle e' in grado di fare da se' dall'acceleratore alla misura, ognuno fa una piccola parte di una grande avventura intellettuale, tutti assieme speriamo di scoprire di piu' sulla natura



Tappa 6/6: il pomeriggio



- Un programma di lavoro ben definito
- Un esercizio semplice, ma vero
- Una piccola competizione internazionale per stimolarci a dare il meglio
- → Tempo per fare domande agli scienziati



